

# Carbon Isotope Fractionation and Its Application in Studying the Light Oil Origin of Chepaizi Uplift in Junggar Basin

Xingyou Xu

Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield Branch Company Sinopec, Dongying  
Email: [xuxingyou.slyt@sinopec.com](mailto:xuxingyou.slyt@sinopec.com)

Received: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2014; revised: May 1<sup>st</sup>, 2014; accepted: May 8<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Based on the isotope data of group components of source rock's physical simulation product, it was found that the  $\delta^{13}\text{C}$  value of saturated and aromatic hydrocarbons showed obvious fractionation. Meanwhile, according to the  $\delta^{13}\text{C}$  value of saturated and aromatic hydrocarbons as well as the group composition data of the oil in Junggar Basin, it was also found that the value and data changed visibly with the fractionation effect in evolution process. So, carbon isotope data cannot serve as a main index in oil and source rock correlation for the light oil mainly with light hydrocarbons in the case of not determining the oil's maturity. As for the light oil in Chepaizi Uplift, its carbon isotope data cannot be as a proof to determine that it was totally or mainly derived from the Jurassic coal-bearing source rocks. On the contrary, the light oil was more likely from the Permian source rocks than from post maturity.

## Keywords

Carbon Isotope, Light Oil in Chepaizi Uplift, Isotopic Fractionation Effect, Physical Simulation

---

# 碳同位素分馏效应与准噶尔盆地车排子地区轻质油来源分析

徐兴友

中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 东营

Email: [xuxingyou.slyt@sinopec.com](mailto:xuxingyou.slyt@sinopec.com)

收稿日期: 2014年4月3日; 修回日期: 2014年5月1日; 录用日期: 2014年5月8日

## 摘要

本文通过对烃源岩物理模拟排出产物族组成碳同位素分析,发现成熟过程中原油饱和烃、芳烃 $\delta^{13}\text{C}$ 会发生明显分馏,结合准噶尔盆地原油饱和烃、芳烃 $\delta^{13}\text{C}$ 与族组成的相关关系分析认为:原油组分及其碳同位素特征在成熟演化过程中会因分馏效应发生明显变化,在以轻质烃类为主要成分的轻质油中,不能有效确定其成熟度的情况下,碳同位素组成不能作为油源对比的主要指标。因此,对车排子轻质油来说,不能以碳同位素值确定其来源于侏罗系煤系烃源岩或以其为主的混原油,其来源为二叠系高过成熟烃源岩可能性大。

## 关键词

碳同位素, 车排子轻质油, 同位素分馏效应, 物理模拟

## 1. 引言

有机质碳同位素在成熟过程中会因分馏作用发生明显改变[1]-[3],特别是天然气同位素组成随成熟度分馏作用非常明显,这已被许多研究资料所证实[4]-[6]。但石油成熟过程中碳同位素的分馏作用研究相对较少,分馏效应对不同成熟阶段原油的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征影响不明确,影响了同位素在高过成熟原油来源分析中的应用。

Tissot 和 Welte[7]等认为,热降解所产烃类的 $\delta^{13}\text{C}$ 往往比干酪根的碳同位素要轻。Bjorøy[8]等的热解实验证明,石油中单体化合物的 $\delta^{13}\text{C}$ 随成熟度升高而变重;Clayton[9][10]认为,液态烃类的生成只会对石油的 $\delta^{13}\text{C}$ 造成比较微弱的影响(接近1‰),对石油的 $\delta^{13}\text{C}$ 值产生比较显著影响的是随成熟度进一步增加而导致的二次裂解。这种裂解过程可导致 $\delta^{13}\text{C}$ 变重3.5‰。为研究热演化过程中的同位素分馏现象,国内许多学者进行过多种类型烃源岩和原油的模拟实验[11]-[14],为同位素演化过程中的分馏研究提供了重要依据。张文正(1989)[1]通过对不同地区煤和烃源岩热模拟分析发现,成熟过程对饱和烃 $\delta^{13}\text{C}$ 影响程度大,可达5‰,对芳烃 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响为1.9‰,对非烃和沥青质影响分别为2.4‰和1.8‰。王新洲等(1996)[15]对烃源岩生烃物理模拟实验中烃源岩的氯仿“A”族组分同位素分析发现,在Ro从0.42%上升至1.1%过程中,饱和烃和芳烃的碳同位素值约变重2.5‰~3.0‰。

车排子地区轻质油被认为来源于侏罗系的一个最重要依据就是碳同位素特征与侏罗系源岩相似[16]-[20]。准噶尔盆地二叠系成熟阶段烃源岩来源中可溶有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 较轻,多在-29‰~-30‰间,排2井轻质油的全油碳同位素的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-26.3‰。本文通过选取东部烃源岩开展生烃模拟试验,借鉴与准噶尔盆地二叠系具有相似沉积环境的烃源岩的大量测试数据,与车排子轻质油的同位素对比,提出了来源新认识。

## 2. 烃源岩生烃热模拟中的同位素分馏

### 2.1. 模拟样品的有机地球化学特征

模拟选择的三个样品的有机质丰度都很高,属于好烃源岩。泥岩样品的有机显微组分以腐泥组为主,

占约 90% 以上, 干酪根类型为 I 型, 成熟度较低, 镜质体反射率  $R_o$  最大的为 0.53%。样品的基本地质与地球化学特征见表 1。

## 2.2. 模拟实验条件

样品研磨至 80 目, 每个样品均分为 5 份, 然后分别称取重约 250 克样品与水以 5:1 的比例混合后装入釜内, 在半封闭条件下进行实验。模拟实验分 5 个温度段进行, 初始温度为室温, 每个温阶(即每个样品的模拟终温)相差 50°C, 分别为 250°C、300°C、350°C、400°C、450°C。实验过程采取一次性升温, 即将每个样品分成 5 等份, 每一份样品均以 25°C/min 的升温速率分别从室温升到所设定的最高热解温度, 恒温 48 小时, 分别代表 5 个不同温度段的模拟过程。压力设定为样品所处地层深度的静岩压力, 其中昌 64 井样品为 63 MPa, 昌 68 井样品为 59 MPa, 王 35 井样品为 51 MPa。

实验产物分气、液、固三部分采集, 产物中气体与液体同时排放, 排出后进行分离, 气体用排水(饱和食盐水)法收集, 瓶装; 液体是油水混合物, 用二氯甲烷进行萃取, 放入坩锅内使二氯甲烷自然挥发, 将剩余的有机产物恒重并进行有机地化分析。

## 2.3. 模拟排出油的族组分稳定碳同位素变化特征

烃源岩生烃物理模拟实验排出油的不同组分的  $\delta^{13}C$  均有明显变化, 但存在一定差异。总体趋势是在模拟温度 350°C 之前, 各组分  $\delta^{13}C$  变化不明显或缓慢变重, 在 350°C~400°C 温度段  $\delta^{13}C$  快速变重, 400°C 后不同组分和样品出现了不同变化趋势(图 1)。

从不同族组分演化过程的同位素变化看, 饱和烃在演化过程中同位素组成变化最明显, 不同样品变化量在 1.3‰~4.0‰ 不等; 芳烃同位素组成变化稍弱, 不同样品变化量在 1.4‰~3.4‰ 之间; 非烃和沥青质变化最小, 各样品均小于 2‰。

从以上模拟实验结果可以看出, 在烃源岩较高成熟阶段(模拟温度 > 350°C,  $R_o$  > 0.8%)时, 烷烃、芳烃  $\delta^{13}C$  分馏作用明显, 可达 3.0‰ 以上, 可见对于高过成熟阶段以烃为主要组分的轻质油和凝析油, 成熟演化的分馏作用对同位素影响是比较显著的。

模拟实验还显示出有机质丰度相对低的样品(a)比丰度高(b)、(c)的样品在热演化中的分馏效应轻的特点。

## 3. 自然演化过程中的同位素分馏

自然条件下的烃源岩生排烃为一个近似开放的体系环境, 因此烃源岩不同演化阶段所形成的烃类会按生排烃阶段分别运移, 与封闭条件模拟实验中各阶段烃类最终混合排出不同, 从这一方面考虑自然演

**Table 1.** The basic geology and geochemistry characteristics of the samples in simulation

**表 1.** 模拟实验所用样品的基本地质与地球化学特征

井号	王 35 井	昌 64 井	昌 68 井
层位	Es4	Ek2	Ek2
岩性	泥岩	泥岩	泥岩
TOC, %	1.8	5.43	6.69
“A”, %	0.0835	0.2455	0.1925
有机质类型	I	I	I
$R_o$ , %	0.31	0.53	0.47

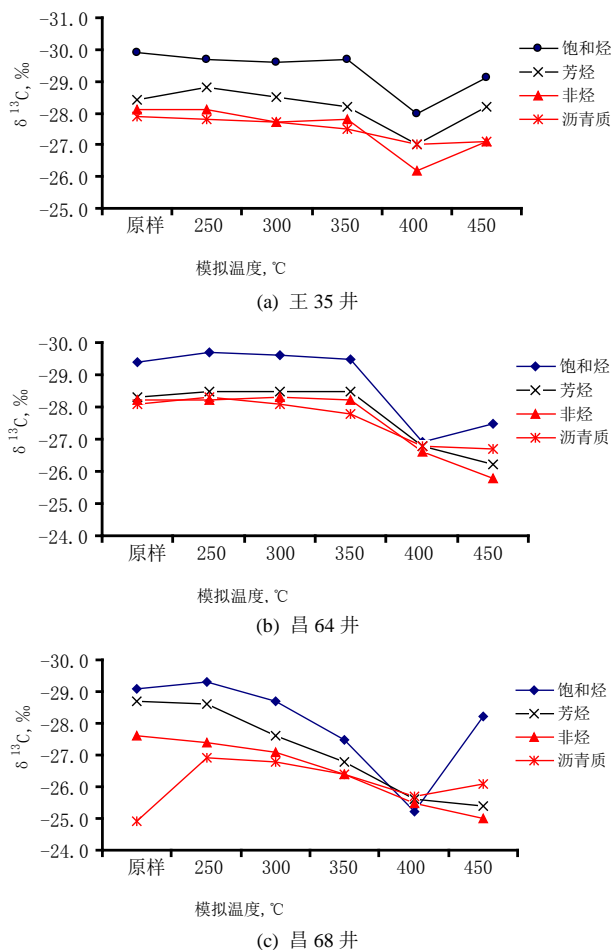


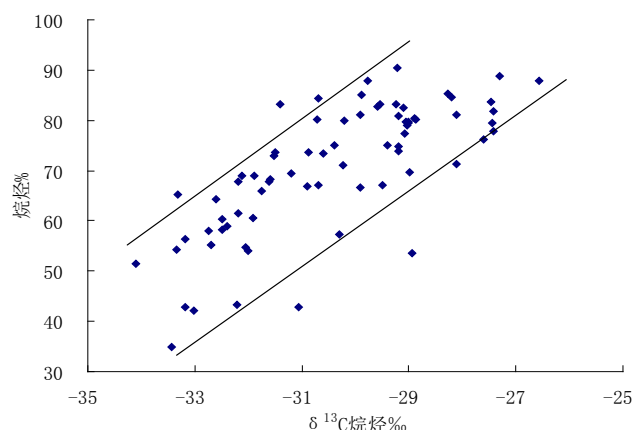
Figure 1. The stable carbon isotopes characteristics of the liquid hydrocarbon products in simulation

图 1. 模拟产物液态烃稳定碳同位素分布特征

化条件下不同成熟阶段所形成的烃类同位素差异可能更大。但自然演化与人工模拟相比，到达同样成熟阶段所经历的温度条件要低很多，从这方面看演化所造成的分馏效应又可能比人工模拟低。因此要确定演化过程中同位素的变化还要对自然样品进行更细致的分析研究。

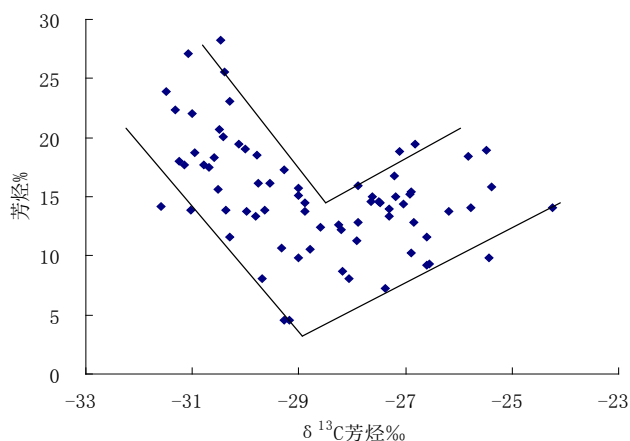
本研究在对准噶尔盆地的原油族组成和碳同位素分析资料全面收集整理基础上，对原油中族组成特征与组分  $\delta^{13}\text{C}$  的关系进行了研究。准噶尔盆地原油饱和烃  $\delta^{13}\text{C}$  与饱和烃含量相关关系如图 2。从图中可见原油中饱和烃  $\delta^{13}\text{C}$  特征与饱和烃含量有明显的正相关性，这种相关性不是仅靠原油来源和不同来源原油混源现象就能解释的。因为没有资料显示碳同位素较重的高等植物为主的烃源岩形成原油的饱和烃含量会比低等水生生物的高，相反现有资料多认为在湖相低等水生生物形成的原油中含有较多饱和烃，因此两者呈现良好相关性最可能的原因就是成熟过程中的同位素分馏作用。众所周知，随演化程度增加原油中饱和烃的含量是不断增加的，成熟过程中饱和烃含量的增加与因分馏效应造成同位素同步变重是其具有良好正相关的关键因素。因此作者认为，自然演化过程中造成的原油同位素分馏效应也非常明显，只是在以前的研究中缺乏表征原油各成熟阶段的可靠指标而忽视了这种分馏作用的影响。

图 3 为准噶尔盆地原油芳烃碳同位素组成与族组成中芳烃含量的关系图，从图中可以发现芳烃碳同位素组成与含量的关系与饱和烃完全不同。碳同位素值相对较轻的样品随含量的降低逐步变重，而碳同



**Figure 2.** The relationships between the saturated hydrocarbon content and its stable carbon isotopes composition of oils in Junggar Basin

**图 2.** 准噶尔盆地原油烷烃碳同位素组成与烷烃含量关系图



**Figure 3.** The relationships between the aromatic hydrocarbon content and its stable carbon isotopes composition of oils in Junggar Basin

**图 3.** 准噶尔盆地原油芳烃碳同位素组成与芳烃含量关系图

位素较重的样品则有变呈相反的趋势。对于出现这种现象的原因从成熟过程中芳烃含量的变化进行了分析。

黄第藩[21]研究发现含煤地层成熟过程中氯仿沥青“A”中饱和烃含量和芳烃含量的变化规律并不是一致的，在主要生排烃期残留在源岩中的可溶有机质芳烃含量出现了增高现象，说明在早期排烃阶段以排出饱和烃为主，造成源岩中芳烃含量相对增多。排出源岩的油中芳烃组成的变化应该与烃源岩中相反，即在早期排油阶段芳烃含量逐步减少，而晚期排烃阶段则芳烃含量逐步增加。如果这一现象在其它类型烃源岩成熟过程中也存在，则准噶尔盆地原油芳烃  $\delta^{13}\text{C}$  在变重过程中，芳烃含量先变低而后变高的规律完全吻合。

以上饱和烃和芳烃含量与  $\delta^{13}\text{C}$  关系充分说明其碳同位素值的变化主要是由成熟度差异造成的，因此自然演化条件下对成熟作用对饱和烃、芳烃  $\delta^{13}\text{C}$  影响也非常明显，图 2、图 3 演化规律看完全可能达到 3.0‰ 以上，这一演化趋势会对以饱和烃和芳烃为主要组分的轻质原油来源确定产生重要影响。

#### 4. 车排子轻质油碳同位素特征及其来源分析

研究中对车排子地区发现的轻质油进行了原油族组成分析(表 2), 结果显示全部样品均不含沥青质, 非烃含量也相对较低, 考虑到部分样品因油质轻低分子饱和烃、芳烃挥发严重造成测定值的闭合度低, 样品中原始总烃含量全部样品均应大于 80%, 部分样品在 90%以上。本区轻质油这种高含轻烃和不含沥青质的特点是高过成熟油气的典型特征。

研究过程中对车排子地区原油同位素和族组成成分进行了较为全面的分析, 并对原油中各组分组成与碳同位素相关性进行了分析。从饱和烃含量与其  $\delta^{13}\text{C}$  关系图中可以看出(图 4)车排子地区原油因保存条件较差, 原油的族组成成分受到一定影响, 重质油油和轻质油的族组成成分和碳同位素组成均差异较大。但碳同位素的变化在模拟和自然演化可能造成变化范围内, 车排子周边稠油前来源为二叠系烃源岩成熟阶段油气[22] [23], 而轻质油族组成显示其为高过成熟阶段产物, 因此本区原油同位素组成特征的变化可能是由成熟作用引起的, 而非母质来源的不同。可见在没有可靠证据轻质油成熟度的情况下, 依据轻质油  $\delta^{13}\text{C}$  来确定原油来源是以高等植物母质为主的侏罗系烃源岩是不可靠的。

Table 2. The group composition of light oils in Chepaizi

表 2. 车排子地区轻质油族组成分析数据数据表

井号	层位	烷烃%	芳烃%	非烃%	沥青质%	总烃%
车 907	N1s	65.46	17.43	5.26	0.00	82.89
车 95 开 1	N1s	69.21	17.46	5.71	0.00	86.67
排 2	N1S	61.43	13.33	5.24	0.00	74.76
排 22	N1s	35.24	35.87	17.14	0.00	71.11
排 2-30	N1s	43.38	8.83	3.64	0.00	52.21
排 2-40	N1S	33.96	7.86	4.09	0.00	41.82
排 2-86	N1s	65.24	18.29	10.37	0.00	83.53
排 2-88	N1s	58.72	26.91	12.23	0.00	85.63
排 8-20	N1S	45.20	11.46	4.64	0.00	56.66

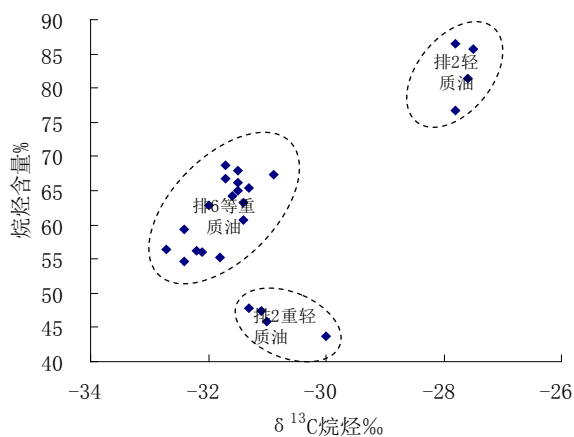


Figure 4. The relationships between the saturated hydrocarbon content and the carbon isotopes composition of the oils in Chepaizi

图 4. 车排子地区原油同位素组成与饱和烃含量关系

## 5. 主要结论

通过以上分析可以看出,成熟过程中原油饱和烃与芳烃碳同位素组成分馏明显,在未确定原油成熟度的情况下,碳同位素组成不能直接作为油源对比的依据,并不能因为轻质油的 $\delta^{13}\text{C}$ 较重,与侏罗系煤系烃源岩抽提物的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征吻合而认为就来自侏罗系烃源岩。车排子轻质油 $\delta^{13}\text{C}$ 较重的原因是其成熟度高造成的,按其族组成表现的成熟特征分析,轻质油来源于二叠系高过成熟烃源岩的可能性大。

## 参考文献 (References)

- [1] 张文正 (1989) 有机质碳同位素的成熟分馏作用及地质意义. *石油实验地质*, **2**, 177-183.
- [2] Price, L.C. (1993) Thermal stability of hydrocarbon in nature: Limits, evidence, characteristics, and possible controls. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, **57**, 3261-3280.
- [3] 张水昌, 王招明, 王飞宇, 等 (2004) 塔里木盆地塔东 2 井油藏形成历史——原油稳定性与裂解作用实例研究. *石油勘探与开发*, **6**, 25-31.
- [4] 邹艳荣, 帅燕华, 孔枫, 等 (2003) 煤成甲烷碳同位素演化的数学模型与应用. *天然气地球科学*, **2**, 92-96.
- [5] 李剑, 刘朝露, 李志生, 等 (2003) 天然气组分及其碳同位素扩散分馏作用模拟实验研究. *天然气地球科学*, **6**, 463-468.
- [6] 王强, 付晓文, 徐志明, 等 (2005) 稳定碳同位素在油气地球化学中的应用及存在的问题. *天然气地球科学*, **2**, 233-237.
- [7] Tissot, B.P. and Welte, D.H. (1978) Petroleum formation and occurrence: A new approach to oil and gas exploration. Springer, Berlin, 526-527.
- [8] Bjorøy, M., Hall, P.B., Hustad, E., et al. (1992) Variation in stable isotope ratios of individual hydrocarbons as a function of artificial maturity. *Organic Geochemistry*, **19**, 89-105.
- [9] Clayton, C.J. and Bjory, M. (1994) Effect of maturity on  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratios of individual compounds in North Sea oils. *Organic Geochemistry*, **21**, 737-750.
- [10] Clayton, C.J. (1991) Effect of maturity on carbon isotope ratios of oils and condensates. *Organic Geochemistry*, **17**, 887-899.
- [11] 廖玉宏, 耿安松, 刘德汉, 等 (2007) 煤生烃过程中成熟度引起的碳同位素分馏效应. *石油实验地质*, **6**, 583-588.
- [12] 陈安定, 张文正, 徐永昌 (1993) 沉积岩成烃模拟实验产物的同位素特征及应用. *中国科学: B 辑*, **2**, 209-217.
- [13] 冯子辉, 迟元林, 杜洪文, 等 (2002) 原油在储层介质中的加水裂解生气模拟实验. *沉积学报*, **3**, 505-509.
- [14] 唐小强, 黄光辉, 张敏, 等 (2010) 裂解热模拟实验中碳同位素变化特征及其地球化学意义. *天然气地球科学*, **6**, 1029-1035.
- [15] 王新洲, 宋一涛, 王学军 (1996) 石油成因与排油物理模拟——方法、机理及应用. 石油大学出版社, 东营, 46.
- [16] 李政, 张林晔, 沈忠民, 等 (2011) 准噶尔盆地车排子凸起轻质油母源及充注方向. *石油实验地质*, **4**, 419-423.
- [17] 张枝焕, 李伟, 孟闲龙, 等 (2007) 准噶尔盆地车排子隆起西南部原油地球化学特征及油源分析. *现代地质*, **1**, 133-140.
- [18] 由伟丰, 孟闲龙 (2006) 准噶尔盆地车排子地区排 2 井油源分析. *中国西部油气地质*, **1**, 56-59.
- [19] 张闻林, 张峭楠, 王世谦 (2003) 准噶尔盆地南缘西部地区原油地球化学特征及油源对比. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, **4**, 374-377.
- [20] 胡海燕 (2009) 车排子凸起排 2 井油源分析. *科技信息*, **36**, 26-27.
- [21] 黄第藩, 熊传武 (1996) 含煤地层中石油的生成、运移和生油潜力评价. *勘探家*, **2**, 6-11.
- [22] 徐兴友 (2008) 准噶尔盆地车排子地区油气成藏期次研究. *石油天然气学报*, **3**, 40-44.
- [23] 沈扬, 李茂榕 (2008) 准噶尔盆地车排子凸起稀、稠油反序分布成因探讨. *石油与天然气地质*, **1**, 66-71.